

Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und
Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin
und dem Institut für Kariesforschung e. V., Berlin,
Biophysikalische Abteilung
(Leiter: Prof. Dr. med. dent. Hans Lenz)

ELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR HISTOLOGIE DER APIKALEN GEWEBE MENSCHLICHER ZÄHNE

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der Zahnmedizinischen Doktorwürde
an den
Medizinischen Fachbereichen der Freien Universität Berlin

vorgelegt von
Michael Biernat
aus Berlin

1971



Digitized by the Internet Archive
in 2026

Aus der Poliklinik und Klinik für Zahn-, Mund- und
Kieferkrankheiten der Freien Universität Berlin
und dem Institut für Kariesforschung e.V., Berlin,
Biophysikalische Abteilung
(Leiter: Prof. Dr. med. dent. Hans Lenz)

ELEKTRONENMIKROSKOPISCHE UNTERSUCHUNGEN ZUR HISTOLOGIE DER APIKALEN GEWEBE MENSCHLICHER ZÄHNE

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung der Zahnmedizinischen Doktorwürde

an den

Medizinischen Fachbereichen der Freien Universität Berlin

vorgelegt von

Michael Biernat

aus Berlin

Referent: Professor Dr. med. dent. Hans L e n z

Korreferent: Professor Dr. med. Willy S c h w a r z



Gedruckt mit Genehmigung der Medizinischen Fachbereiche
der Freien Universität Berlin

Promoviert am 9. März 1971

MEINEN ELTERN

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
A. EINLEITUNG	9
B. LITERATURÜBERSICHT	10
C. MATERIAL UND METHODE	15
I. Material	15
II. Methode	15
1. Die Glutaraldehyd-Osmium-Fixierung und Einbettung	15
2. Das Dünnschnittverfahren	16
3. Das Ultradünnschnittverfahren	18
4. Die Nachkontrastierung	18
D. ERGEBNISSE	21
I. Die allgemeine Mikromorphologie der apikalen Gewebe	21
II. Die spezielle Mikromorphologie der apikalen Gewebe	24
1. Das Pulpagewebe	24
a) Die Zellen	24
b) Die Interzellulärsubstanz	26
c) Die Gefäße	27
d) Die Nerven	29
2. Das Hartgewebe	30
a) Das zementähnliche Gewebe	30
b) Das Dentin	32
Abbildungen	34
E. DISKUSSION	54
F. ZUSAMMENFASSUNG	61
G. LITERATURVERZEICHNIS	63

A. E I N L E I T U N G

In den vergangenen Jahren sind in der zahnärztlichen Literatur heiße und teilweise erregte Diskussionen über Gewebsveränderungen im apikalen und periapikalen Bereich menschlicher Zähne nach Anwendung verschiedenartiger Wurzelkanalbehandlungsmethoden geführt worden. Hierbei hat man Thesen und Antithesen aufgestellt und oft widersprüchliche Dinge behauptet.

Befaßt man sich nun mit der Literatur über die Histologie der Pulpa und die geweblichen Veränderungen vor Beginn und nach Abschluß einer Wurzelkanalbehandlung, so muß festgestellt werden, daß fast sämtliche Untersuchungen bisher auf lichtmikroskopischem Weg erfolgt sind. Damit sind bis auf den heutigen Tag die Möglichkeiten, welche die moderne Forschung durch das Elektronenmikroskop mit seinem hohen Auflösungsvermögen bietet, kaum genutzt worden. Die Gründe hierfür mögen die schwierigen Präparationsbedingungen sein, die erforderlich sind, wenn Hart- und Weichgewebe nebeneinander untersucht werden sollen.

Wie sich immer wieder gezeigt hat, bedarf die Feinstrukturanalyse der Zahngewebe unbedingt der elektronenmikroskopischen Untersuchung, da die einzelnen Bauelemente unterhalb des lichtoptischen Auflösungsvermögens liegen.

Deshalb soll die Aufgabe dieser Arbeit sein, neue Erkenntnisse über die Feinstruktur der apikalen Gewebe zu gewinnen, um die bereits gesammelten zu ergänzen und aus ihnen Konsequenzen für die praktische Zahnheilkunde ziehen zu können.

B. L I T E R A T U R Ü B E R S I C H T

Die Literatur, die den histologischen Aufbau der Apikalregion der Zähne, insbesondere den des Foramen apicale, zu klären sucht, ist fast ausschließlich das Ergebnis lichtmikroskopischer Untersuchungen.

Erst in jüngster Zeit sind Ansätze sichtbar geworden, die Feinstruktur der Pulpa auf elektronenmikroskopischem Weg zu erforschen. In den überwiegenden Fällen sind diese Untersuchungen jedoch auf spezielle Fragestellungen gerichtet, wie z.B. die Innervation der Pulpa. Über die Zahnhartsubstanzen liegt wesentlich mehr Literatur vor. Hier wiederum sind offensichtlich über die pulpanahen Hartgewebe und deren Beziehung zur Pulpa noch keine Arbeiten angefertigt worden. Die Kenntnis dieser Verhältnisse aber ist eine wichtige Voraussetzung dafür, Zustände und Veränderungen in dieser Region des Zahnes verstehen und erklären zu können.

G. FISCHER (1932, 1949, 1952, 1953) war einer der Autoren, die sich sehr eingehend mit den apikalen Verhältnissen der Zähne befaßt haben. In seinen umfassenden lichtmikroskopischen Arbeiten geht er insbesondere auf die histologische Beschaffenheit des Apex im Bereich des Foramen apicale ein, dessen große Bedeutung für die Wurzelkanalbehandlung er hervorhebt. G. FISCHER (1952) teilt das Foramen apicale "im gesunden, intakten Zahn" in drei Abschnitte ein, die er als physiologisch zusammengehörig bezeichnet. Der erste Abschnitt ist das Endgebiet der lockeren Wurzelpulpa 1 - 1,5 mm v o r der Wurzelspitze. Daran schließt sich ein fibrilläres Zwischengewebe, das sog. Mischgewebe, welches sich bis zur Wurzelspitze zieht und aus Pulpa und Wurzelhaut besteht. Hierfür hat G. FISCHER den Begriff "physiologisches Foramen" geprägt. Der dritte Abschnitt wird von der reinen Wurzelhaut an der Wurzelspitze a u ß e r h a l b des Foramen apicale

aufgebaut. Alle drei Gewebeszonen bilden während des ganzen Lebens eine biologische Einheit. Weiterhin wird ausgeführt, daß "am Ausgang der Wurzelspitze bevorzugt Zement, in höheren Gebieten aber sekundäres Dentin vorhanden sein muß". Am Beispiel der Wurzelspitzenbildung im jugendlichen Zahn weist der Autor das Einwachsen des straffen Wurzelhautgewebes in das lockere Pulpagewebe nach, welches sich daraufhin zu dem oben erwähnten Mischgewebe formt (1953). In ihm soll der Einfluß der Odontoblasten immer mehr zurückgedrängt werden, so daß diese bereits kurz nach Durchbruch der Zähne verschwinden.

Was die foraminale Abschnitte betrifft, ist TSCHAMER (1968) der gleichen Auffassung wie G. FISCHER. Zur Zementablagerung führt dieser Autor aus, daß sich das Zement häufig "auf der pulpalen Oberfläche des Dentins eine Strecke weit" fortsetzt und "gewissermaßen die Auskleidung des apikalen Wurzelkanalanteiles" bildet. Auch SELTZER und Mitarbeiter (1966) haben bei ihren Untersuchungen an einigen Zähnen eine Ausdehnung von Zement in den Wurzelkanal hinein beobachtet, und zwar über eine beträchtliche Distanz. Gelegentlich ist dentin- und zementähnliches Gewebe gesehen worden. Ferner wird das Vorkommen von Mineralisationen erwähnt, die von feinen diffusen, fibrillären bis zu großen dentikelähnlichen Anhäufungen reichen. Die Ergebnisse der apikalen Pulpauntersuchungen dieses Autors decken sich, soweit sie die kollagenen Bindegewebsfasern betreffen, mit den Beobachtungen von G. FISCHER und TSCHAMER. Nach KLUCZKA (1954) endet das ausgesprochene Pulpagewebe lichtmikroskopisch ca. 0,25 - 0,5 mm vor dem "eigentlichen Foramen apicale", klinisch dagegen 1 - 1,5 mm. Dies steht im Gegensatz zu den Ergebnissen von G. FISCHER (1952), in denen die lockere Wurzelpulpa lichtmikroskopisch (nicht klinisch!) 1 - 1,5 mm vor der Wurzel-

spitze endet, was oben bereits ausführlich beschrieben worden ist. Auch betrachtet KLUCZKA die Hartgewebsbildung im Apikalbereich recht unkompliziert, wenn er sagt, daß von der Pulpa Dentin, von der Wurzelhaut Zement und von beiden ein gemischtes Hartgewebe geliefert wird. Hierzu hat sich G. FISCHER im Jahr 1932, bereits über 20 Jahre zuvor, wesentlich präziser geäußert, indem er das gebildete Hartgewebe als gemeinsames Produkt von n u r Zement liefernden Fibroblasten und einigen restierenden Odontoblasten bezeichnet hat.

Wie schon angedeutet, liegen sehr viele Arbeiten über die Ultrastruktur des Dentins und des Zements vor. Die Zementuntersuchungen beziehen sich ausschließlich auf die Wurzelaußenseite der Zähne. Stellvertretend für die zahlreichen Autoren, die sich mit diesen beiden Hartgewebsformen befaßt haben, seien hier FRANK (1967), SCOTT und NYLEN (1962), HERTING (1969) und KUNG (1970) genannt. HERTING spricht beim gesunden reifen Dentin von "langen dunklen dünnen Kristallen", welche in großer Zahl die Kollagenfibrillen der organischen Matrix besetzen. Daneben existieren helle Kristalle. FRANK beschreibt dieses Bild, an SCOTT und NYLEN anknüpfend, folgendermaßen: "The organic matrix, composed of mucoproteins and collagenous fibrils, with periodic transverse striations, is impregnated with apatite crystals, clearly smaller than those of the enamel, but larger than those of the bone and cement". Und weiterhin führt FRANK die Autoren HÖHLING, HAKE und KATTERBACH (1966) an, die beobachtet haben, "that dense crystals, in the form of needles, coexist beside transparent crystals", was den Ausführungen von HERTING entspricht. KUNG hat 1970 erste elektronenmikroskopische Untersuchungen der TOMES'schen Körnerschicht im Dentin abgeschlossen, welche die Entstehung und die Ultrastruktur dieses Bereichs eindeutig klären.

Das Zement betreffend sind die von HELMCKE (1953) stammenden ersten elektronenoptischen Aufnahmen immer noch von grundlegender Bedeutung. Spätere Untersuchungen von HERTING (1962) beziehen sich auf das Vorkommen der verschiedenen Zementformen im Zahnwurzelbereich.

Es gehört zu den Aufgaben der vorliegenden Arbeit, das in der Lichtmikroskopie als Zement gedeutete Hartgewebe innerhalb des Pulpakavum auf seine Ultrastruktur hin zu untersuchen. Erste spezielle submikroskopische Untersuchungen sollen außerdem die Feinstruktur der Wurzelpulpa, insbesondere die der Region des Foramen apicale, klären. Von RIEDEL, TALLEN und FROMME (1966) liegen neben lichtmikroskopischen auch elektronenmikroskopische Untersuchungsergebnisse der gesamten Pulpa vor. Die in dieser Arbeit gegenübergestellten Befunde beider optischer Verfahren machen deutlich, daß die Lichtmikroskopie nicht imstande ist, neue Erkenntnisse in der Struktur dieses Organs zu gewinnen. Auf elektronenoptischem Weg kommen die Autoren zu wesentlich präziseren Ergebnissen. Sie gehen zuerst auf die kollagenen Fasern der Interzellulärsubstanz ein. Die Ultrastruktur dieser Fasern ist mit der von BUCHER (1967) beschriebenen, die sich auf die Bindegewebsfasern der allgemeinen Körpergewebe bezieht, identisch. RIEDEL, TALLEN und FROMME weisen innerhalb der Pulpa im wesentlichen zwei unterschiedliche Zelltypen nach. Der erste entspricht den Zellen, die in der Lichtmikroskopie als Fibrozyten bezeichnet werden. Vom zweiten Typ nehmen sie mit großer Wahrscheinlichkeit an, daß es sich bei ihm um Odontoblasten handelt.

Was die Gefäßversorgung der Pulpa angeht, weisen RIEDEL, TALLEN und FROMME (1966) auf den ungeheuren Reichtum an Kapillaren hin. Sie beschreiben mehrere Typen und ordnen

diese in das von BENNET, LUFT und HAMPTON (1959) aufgestellte Strukturschema ein. Ein besonderer Kapillartyp wird ausschließlich in der Wurzelpulpa gefunden. Im Zytoplasma seiner Endothelzellen sind u.a. Einschlusskörperchen unterschiedlicher Größe zu beobachten, welche den Angaben der Autoren zufolge nie in Endothelzellen von eindeutig als Blutkapillaren identifizierten Gefäßen gefunden werden können.

Auf die Innervation der Pulpa eingehend, werden in derselben Arbeit "marklose" und "markhaltige" Nervenfasern nachgewiesen, von denen erstere im Kronenanteil überwiegen und in ihren Achsenzyklindern vermehrt Neurofilamente, Vakuolen und Mitochondrien enthalten. Genauere Beschreibungen beider Arten von Nervenfasern sind bei HAIM (1965), MATTHEWS, DORMAN und BISHOP (1959) und UCHIZONO und HOMMA (1959) zu finden. In den wesentlichen Einzelheiten decken sich die Befunde dieser vier Arbeiten.

In der vorliegenden Arbeit werden die Nervenfasern nicht als "marklose" und "markhaltige" bezeichnet, sondern als "markarme" und "markreiche", wie es STÖHR, v. MÖLLENDORFF und GOERTTLER (1963) aus verständlichem Grund tun.

C. MATERIAL UND METHODE

I. Material

Für die elektronenmikroskopischen Untersuchungen kamen ausschließlich bleibende vitale menschliche Zähne zur Verwendung. Ausgeschlossen wurden Zähne, deren Pulpen im klinischen Sinn geschädigt waren. Aus dem reichhaltigen Material wurden zehn Zähne ausgewählt, deren Weichgewebe im Foramen apicale bei der Extraktion mit Sicherheit unbeschädigt geblieben war. Die Auswahl enthielt ein- und mehrwurzelige Zähne von Patienten beiderlei Geschlechts. Die Altersspanne reicht vom 14. bis zum 84. Lebensjahr.

II. Methode

1. Die Glutaraldehyd-Osmium-Fixierung und Einbettung

Unmittelbar nach Extraktion der Zähne wurden die Wurzelspitzen in einer Länge von ca. 4 mm mit dem Airotor unter sorgfältiger Wasserkühlung abgetrennt, vorsichtig abgetupft und mindestens sechs Stunden lang in 5%igem, auf pH 7,2 - 7,4 phosphatgepufferten Glutaraldehyd im Kühlschrank bei 6°C einzeln aufbewahrt. Die Nachfixierung und Einbettung der Präparate schloß sich wie folgt an:

- a) Mit physiologischer NaCl-Lösung auswaschen und
- b) in ein Phosphatpuffergemisch von pH 7,2 - 7,4 für mindestens 18 Stunden geben.
- c) Darauf in veronalazetatgepuffelter, isotonischer OsO_4 -Lösung von pH 7,2 über 2 Stunden fixieren und
- d) mit physiologischer NaCl-Lösung abspülen.

e) Entwässern:

- 5 Minuten in 50%igem Alkohol,
- 5 Minuten in 75%igem Alkohol,
- 5 Minuten in 95%igem Alkohol,
- 2 x 10 Minuten in absolutem Alkohol,
- 1 x 30 Minuten in absolutem Alkohol,
- überspülen mit Styrol,
- 1 x 30 Minuten in Styrol,
- 2 x 30 Minuten in Styrol.

f) Überführen in Mikropal-Styrol im Verhältnis 1:1
(+ Katalysator + Aktivator) für 1 Stunde.

g) Überführen in Mikropal (+ Katalysator + Aktivator)
für 24 Stunden bei Zimmertemperatur.

h) Einbringen der Präparate in Eiswürfelkästchen; auffüllen
mit Mikropal (+ Katalysator + Aktivator) und evakuieren.

i) Polymerisation über 12 - 36 Stunden bei 60°C im Trocken-
schrank.

2. Das Dünnschnittverfahren

Mit Hilfe einer Schneidmaschine der Firma Dr. STEEG & REUTER wurden die im Kunststoffblock liegenden unentkalkten Wurzelspitzen vom Apex her senkrecht zur Zahnachse in 0,6 mm dicke Scheiben geschnitten. Bei Zähnen, deren Foramina im äußersten Apikalbereich lagen, war zu beachten, daß die diamant-
tierte Schneidscheibe von 0,35 mm Stärke beim ersten Schnitt so eng wie möglich am Apex vorbeilief, ohne ihn jedoch zu berühren, damit die Garantie eines vollständig erhaltenen Foramen apicale im ersten Dünnschnitt gegeben war. In den Fällen, in denen die Wurzelspitze gekrümmt war oder das Foramen apicale nicht am äußersten Teil der Spitze, sondern etwas zur Seite hin gelegen war, wurde der unbrauchbare

Wurzelteil dicht unterhalb des Foramen abgetrennt. Somit lagen auch hier die Austrittsstellen der Pulpa im ersten Dünnschnitt. Die zweite Trennung erfolgte nach 0,6 mm, die dritte und vierte in den gleichen Abständen. Die Gesamtdistanz vom Foramen apicale bis zum dritten Dünnschnitt einschließlich betrug folglich 2,5 mm. Innerhalb dieser Zone entgingen also zweimal 0,35 mm Verschnitt der elektronenmikroskopischen Auswertung, wobei zu beachten ist, daß die Trennungen in Regionen erfolgten, die im Hinblick auf die Ergebnisse von unwesentlicher Bedeutung sind (siehe unten abgebildetes Schema).

Es wurde auch Wert auf die Erfassung von Seitenkanälen gelegt. Infolge des jedoch hierfür ungünstigen Schnittverfahrens kamen nur sehr wenige dieser Kanäle zum Anschnitt, die bei ca. 2 mm Entfernung vom Foramen apicale relativ hoch gelegen waren.

Die auf die eben geschilderte Weise erhaltenen Dünnschnitte wurden so zurechtgeschnitten, daß sie in Gelantinekapseln gestellt werden konnten, welche mit Mikropal (+ Katalysator + Aktivator) aufgefüllt und evakuiert wurden. Die Polymerisation erfolgte wiederum 12 - 36 Stunden lang bei 60°C.



Schematischer Querschnitt
einer Wurzelspitze

- | | |
|------------------------|------------|
| | Hartgewebe |
| | Pulpa |
| | Verschnitt |
| a, b, c = Dünnschnitte | |

Nach Aufweichen und Entfernen der Gelantinekapseln wurden die Präparate in den gewünschten Bereichen angespitzt, entweder direkt im Hart- bzw. Weichgewebe oder in der Grenzzone zwischen Pulpa und Dentin. Dies geschah zuerst mit Hilfe einer diamantierten Feile und schließlich mit der Rasierklinge zum Herausarbeiten der letzten Feinheiten. Hierbei müssen die für die elektronenmikroskopische Untersuchung bestimmten Objektstellen in den Spitzen vierseitiger stumpfwinkliger Pyramiden liegen. Die Präparation wurde an einem Binokularlupen-Präpariermikroskop der Firma BAUSCH & LOMB vorgenommen.

3. Das Ultradünnschnittverfahren

Von den in der beschriebenen Weise angespitzten Präparaten wurden nun an einem LKB-ULTRATOME TYPE 4800 A mit Diamantmessern Ultradünnschnitte von ca. 0,04 μ Stärke angefertigt. Diese wurden an der Messeroberfläche in niedrigprozentigem Alkohol aufgefangen, mit Hilfe von Chloroformdämpfen gestreckt und mit formvarbefilmten Trägernetzen aufgefischt. Diese Kupfernetze haben einen Durchmesser von 3 mm. Die ihnen anhaftenden Alkoholtropfen wurden sofort mit Filterpapier abgesaugt. Anschließend gelangten die Netze zum Trocknen in eine LKB-SPECIMEN GRID BOX. Nach mehreren Stunden erfolgte die Untersuchung an einem ELMISKOP I A der Firma SIEMENS bei einer Strahlspannung von 80 kV.

4. Die Nachkontrastierung

Da die Zahnhartsubstanzen durch eine Nachkontrastierung mit löslichen Schwermetallsalzen, wie z.B. Uranylazetat und Bleizitrat, zumindest teilweise entmineralisiert und somit für die elektronenmikroskopische Auswertung unbrauchbar ge-

macht werden, war es unbedingt notwendig, sämtliche Ultra-
dünnschnitte, auch wenn sie noch so wenig Hartschubstanz ent-
hielten, vor einer solchen Nachkontrastierung im Elektronen-
mikroskop zu betrachten. Dieser Weg hat den großen Nachteil,
daß die hochempfindliche Netzbefilmung schon durch das erst-
malige Mikroskopieren leicht geschädigt werden kann, was
über eine weitere Schädigung durch das Nachkontrastieren
hinaus beim zweiten Mikroskopieren unter Umständen zum Zer-
reißen des Films führt. So kann der Ertrag an hochwertigem
Photomaterial auch bei sorgfältigstem Vorgehen gering sein.
Selbst reine Weichgewebsschnitte waren diesen Gefahren aus-
gesetzt, da auch sie mit Rücksicht auf eventuell doch vor-
handene Hartschubstanzbildungen auf dem beschriebenen Weg zur
Nachkontrastierung gelangten.

Nachkontrastiert wurde kollagenspezifisch mit Uranylazetat
bzw. Uranylazetat und Bleizitrat, wobei alle Präparate, die
kollagene Fasern, Zellen und Gefäße enthielten, ausschließ-
lich mit Uranylazetat behandelt wurden, wohingegen die Nerv-
präparate zur besseren Glykogendarstellung zusätzlich einer
weiteren Nachkontrastierung mit Bleizitrat unterzogen wurden.

Die Herstellung der Uranylazetatlösung erfolgte, indem einer
beliebigen Menge von 70%igem Alkohol unter 30 Minuten lan-
gem Schütteln Uranylazetat bis zur Sättigung zugeführt wurde
(Modifikation nach PEASE, 1964). Nach mehrtägiger Aufbewah-
rung im Kühlschrank bei 6°C stand eine glasklare Lösung
über einem beträchtlichen Bodensatz zur Verfügung. Sie wurde
vorsichtig mit der Pipette entnommen und zum Nachkontrastie-
ren verwandt. Die Trägersetze wurden 30 Minuten lang mit
der befilmten Seite nach oben in wenige, auf Uhrgläsern be-
findliche Tropfen Lösung gelegt und nach dem Herausnehmen
mit 70%igem Alkohol und Aqua dest. abgespült. Die verblei-

benden Tropfen wurden mit Filtrierpapier abgesaugt. Abschließend gelangten die Netze zum Trocknen in die Box.

Bei Anwendung dieser Methode war auffällig, daß ohne jegliches Filtrieren der Uranylazetatlösung eine optimale Sauberkeit der Ultradünnschnitte erreicht werden konnte.

Die Nervpräparate wurden in der gleichen Weise nachkontrastiert, jedoch nur 15 Minuten lang in der Uranylazetatlösung belassen. Daran schloß sich die weitere Behandlung über 5 Minuten mit einer Bleizitratlösung im alkalischen Milieu (REYNOLDS, 1963). Abspülen und Trocknen der Präparate erfolgten in der beschriebenen Weise.

D. E R G E B N I S S E

I. Die allgemeine Mikromorphologie der apikalen Gewebe

Beim Betrachten der unentkalkten Ultradünnschnitte des apikalen Pulpagewebes fällt der große Reichtum an kollagenen Fasern auf, der koronalwärts allmählich abnimmt. Dies ist unabhängig vom Alter an allen Zähnen bis zur untersuchten Höhe von 2,5 mm zu beobachten. Selbst auf Übersichtsaufnahmen mit relativ niedrigen elektronenoptischen Vergrößerungen kann ständig die typische Querstreifung der Kollagenfibrillen gesehen werden (Abb. 1). Sie sind in der Mehrzahl längs-, in geringerem Maß schräg getroffen. Weniger häufig sind Faserquerschnitte anzutreffen. Zwischen den Faserzügen können zwei unterschiedliche Typen von Zellen gefunden werden (Abb. 1, 2, 3, 4 und 5). In einem Fall einer retikulären Atrophie der Pulpa sind in ausgedehnten Bereichen mehr oder weniger strukturloser Grundsubstanz neben aufgelockerten kollagenen Fibrillenbündeln Zellreste zu erkennen (Abb. 6).

Gefäße können im submikroskopischen Bild nur in geringer Zahl ausgemacht werden. Auf planförmig zusammengesetzten Aufnahmen sind viele Gebilde zu beobachten, die als kollabierte Kapillaren betrachtet werden können. Häufige Erythrozytenansammlungen und Hämorrhagien lassen die unmittelbare Nähe von größeren Gefäßen vermuten. Ermittelt werden konnten zumeist vollständige Kapillarquerschnitte. In Abb. 8 und 9 sind Teile einiger Querschnitte wiedergegeben.

Einige Ultradünnschnitte zeigen sehr zahlreich vorhandene Nervenfaserverquerschnitte. Hierbei handelt es sich um solche von markreichen und markarmen Fasern, deren zahlenmäßiges

Verhältnis zueinander ungefähr gleich ist. In erster Linie imponieren jedoch die Querschnitte der markreichen Fasern, da sie im elektronenmikroskopischen Bild ihrer dunklen Markscheide wegen weitaus auffälliger sind als die der markarmen mit ihren relativ hellen Achsenzylindern, welche vom ebenso kontrastarmen Zytoplasma der SCHWANN'schen Zellen umgeben sind (Abb. 10 und 13). Dies kann bei erster flüchtiger Betrachtungsweise den Trugschluß eines fast ausschließlichen Vorhandenseins markreicher Nervenfasern im Apikalbereich der Pulpa veranlassen. Sehr oft sind die Kerne der SCHWANN'schen Zellen angeschnitten worden, jedoch fast nur bei den markreichen Fasern.

In der Grenzzone zwischen Pulpa und Dentin ist letzterem stets ein mehr oder weniger ausgedehnter Prädentinbezirk vorgelagert. Die zumeist sehr dicht gepackten Kollagenfibrillen sind im submikroskopischen Bild trotz ihrer Helzigkeit sehr gut zu erkennen (Abb. 14 und 20). Selbst die Querstreifung kann in diesem Zustand oft beobachtet werden (Abb. 17). Die Kontrastarmut der Fibrillen, die nicht als Negativkontrastierung angesehen werden darf, ist auf eine trotz eingehaltener Fixationsdauer ungenügende Fixierung in der OsO_4 -Lösung zurückzuführen. Die Ursache liegt in den erschwerten Diffusionsverhältnissen. Die Lösung, welche von zwei Seiten der Wurzelspitze in den Kanal diffundiert, vermag diesen nicht vollständig und gleichmäßig zu durchdringen. Mit Hilfe der beschriebenen Nachkontrastierung ist es gelungen, auch die Strukturierung der Prädentinzone deutlich darzustellen (Abb. 15 und 16).

Dem unverkalkten Prädentin schließt sich nun die eigentliche Hartgewebsregion an. In den weitaus meisten Fällen ist ein stark dem Zement ähnelndes Gewebe zu finden, wel-

ches z.T. in mehreren, unterschiedlich mineralisierten Lagen aufeinandergeschichtet ist, wobei der Mineralisationsgrad in Richtung auf das Dentin zunimmt (Abb. 22 und 23).

Im Prädentin liegend, in unmittelbarer Nähe der Hartgewebsrandzone, sind häufig Mineralisationen unterschiedlicher Größe zu beobachten. Sie reichen von feinen, diffusen Anhäufungen kristallähnlichen Charakters bis hin zu großen fibrillären, dentikelähnlichen Gebilden, die manchmal auch aus mehreren zementähnlichen Schichten bestehen.

Dem Dentin der Randzone fehlt die typische Struktur des normalen Dentins, welches im höher gelegenen Wurzel- und Kronenbereich angetroffen wird. Es handelt sich um nicht-kanalisiertes Dentin. Die Dentinkanäle sind obliteriert (Abb. 19).

Innerhalb der Seitenkanäle zeigen sich im wesentlichen weder in der Weichgewebsstruktur noch in der Beschaffenheit der Kanalwände Unterschiede zu den Verhältnissen in den Hauptkanälen (Abb. 15, 23 und 24).

II. Die spezielle Mikromorphologie der apikalen Gewebe

1. Das Pulpagewebe

a) Die Zellen

In dem stark bindegewebigen Endbereich der Wurzelpulpa sind lediglich zwei Typen von Zellen anzutreffen. Die SCHWANN'schen Zellen der Nervenfasern und die Endothelzellen der Gefäße werden in den entsprechenden Kapiteln beschrieben.

Der erste Zelltyp ist direkt in der Region des Foramen apicale zu finden. Es handelt sich hierbei um langgestreckte, sehr schlanke Zellkörper mit ebenso geformten Kernen (Abb. 4). Diese Zellen besitzen an ihren beiden Polen lange, fingerförmig ausgestreckte Zytoplasmaausläufer (Abb. 5), die sich mit denen ihrer Nachbarzellen größtenteils eng berühren, wodurch ein netzähnlicher Zellverband gebildet wird. In allen Fällen aber können an den Berührungsflächen die Membranen der einzelnen Zellausläufer erkannt werden. Die "Maschen" sind mit dichten kollagenen Fibrillenbündeln ausgefüllt. Im Zytoplasma sind Teile des endoplasmatischen Retikulum zu erkennen. Die Membranen der zahlreichen endoplasmatischen Ausstülpungen sind dicht mit Ribosomen besetzt, die als schwärzliche Granula im elektronenoptischen Bild imponieren. Sie kommen ebenfalls in ihrer anderen, frei im Zytoplasma befindlichen Form vor. Neben den Ribosomen sind als weitere wesentliche intrazytoplasmatische Einschlüsse Mitochondrien in geringer Zahl vorhanden. Die spindelförmigen Kerne werden teilweise nur von einem sehr feinen Zytoplasmastreifen begleitet, der an der engsten Stelle 0,04 μ , an der breitesten 0,3 μ mißt. Der Chromatingehalt der Zellkerne ist sehr hoch, wobei die

dunklen Chromatingranula je nach der Schnittrichtung entweder an der doppelten Kernmembran abgelagert oder in dichten Haufen im Zytoplasma verteilt sind. Diese Zellen können mit großer Wahrscheinlichkeit als Fibrozyten gedeutet werden.

Der andere Zelltyp ist schon bei oberflächlicher Betrachtung wesentlich plumper und mit einem viel größeren, rundlich bis ovalen Kern ausgestattet (Abb. 2 und 3). Im Schnitt beträgt der Kerndurchmesser ca. 4 μ , wohingegen der der Fibrozyten zwischen 0,14 und 1,4 μ schwankt.

Die Kerndichte des zweiten Zelltyps ist geringer als die des ersten. Das Chromatin befindet sich hier zu seinem größten Teil an der Kernmembran, die ebenfalls als Doppelmembran zu erkennen ist. Innerhalb eines Kernes sind oft mehrere Nukleoli angeschnitten worden, welche deutlich ihre Maschenwerkstruktur zeigen. Auf einem Übersichtsbild, das acht Zellen zeigt, sind innerhalb aller Kerne die Nukleoli getroffen, was darauf hindeutet, daß es sich um eine epitheloidzellartige Anordnung dieser Zellen zu handeln scheint (Abb. 1). Intrazytoplasmatisch weisen sie im Gegensatz zu den Fibrozyten einen wesentlich höheren Bestand an Mitochondrien auf, deren Cristae mitochondriales kräftig ausgebildet sind (Abb. 3). Ein weiterer Unterschied liegt im Vorhandensein von Vakuolen. Der Ribosomenbesatz des hier schwächer ausgebildeten endoplasmatischen Retikulum ist fast ebenso groß. Die breiteren Ausläufer der einzelnen Zellen nehmen auch bei diesem Typ engen Kontakt miteinander auf. Diese Zellart wird im Endgebiet der apikalen Pulpa angetroffen. Ihrer mikromorphologischen Struktur und dem Reifungsgrad nach kann es sich um Fibroblasten handeln.

Auffallend in dem den Hartgeweben anliegenden Bereich ist das nahezu vollständige Fehlen von typischen Odontoblasten. Vereinzelt im Prädentin liegende Odontoblastenfortsätze weisen jedoch daraufhin, daß es gelegentlich zur Ausbildung dieser Zellart kommt. Charakteristisch für die Fortsätze ist die fädige Struktur des Zytoplasma (Abb. 16).

b) Die Interzellulärsubstanz

Die die Fibroblasten und Fibrozyten umhüllende Interzellulärsubstanz besteht im apikalen Bereich der Pulpa fast vollständig aus kollagenen Fibrillen. Während bei jungen Individuen noch einzelne Fibrillen zu finden sind, kann schon bei etwas älteren die Zusammenlagerung zu Fibrillenbündeln, im Greisenalter zu derben Fasersträngen, beobachtet werden. Die Fibrillen haben einen Durchmesser von ca. 0,3 bis 0,5 μ und sind im Elektronenmikroskop noch weiter auflösbar in Mikrofibrillen. Bei ihnen wird eine Stärke von ca. 0,04 μ gemessen. Wesentlich stärker hingegen sind die jüngsten Mikrofibrillen. Sie weisen unterschiedliche Durchmesser bis zu 0,2 μ (das Fünffache der ausgereiften Form!) und eine kürzere Periodenlänge auf (Abb. 15 und 16).

Die kollagenen Mikrofibrillen weisen die für sie typische Querstreifung auf, die aus hellen und dunklen Abschnitten besteht (Abb. 7). Diese ist auf den regelmäßigen Wechsel von durchstrahlbaren und dichteren Anteilen zurückzuführen. Es liegen in den dunklen Zonen die Polypeptidketten dichter gepackt als in den hellen. Die Periodizität bewegt sich in der Größenordnung von 0,064 μ .

Eine sehr wichtige optische Eigenschaft der Kollagenfasern ist ihre Doppelbrechung im polarisierten Licht. Da sie aus

geordneten Molekülverbänden bestehen, weisen sie als solche in verschiedenen Richtungen unterschiedliche optische Eigenschaften auf (Anisotropie), was ihre Doppelbrechung bedingt. Die kollagenen Fasern werden als positiv einachsig doppelbrechend bezeichnet, wobei die optische Achse der Längsachse der Fibrillen entspricht.

In der engen Umgebung von Gefäßen und Nerven sind die Fibrillenbündel fast ausschließlich parallel zu diesen ausgerichtet.

Der Zusammenhalt der morphologisch verschiedenen Bestandteile der kollagenen Fasern über die Fibrillen hinaus bis zu den Mikrofibrillen ist durch eine amorphe, mukopolysaccharidhaltige Kittsubstanz gewährleistet, die sich jedoch in der DurchstrahlungsElektronenmikroskopie nicht darstellen läßt.

Der zweite Bestandteil der Interzellulärsubstanz, die gallertige Grundsubstanz, zeigt sich im submikroskopischen Bild als mehr oder weniger strukturlose, homogene Masse (Abb. 6). Sie ist zum größten Teil wasserlöslich und, abhängig von ihrer Zusammensetzung, mehr sol- oder mehr gelartig. Gebildet werden soll die Grundsubstanz in der Hauptsache von den Bindegewebszellen. Andere, kleinmolekulare Stoffe stammen aus dem Blutplasma. Von Wichtigkeit ist die Tatsache, daß der Grundsubstanzgehalt des Bindegewebes mit steigendem Lebensalter abnimmt.

c) Die Gefäße

Neben den zu- und abführenden Gefäßen werden in der apikalen Pulpa Kapillaren angetroffen. Auf den Ultradünnschnitten zeigen sich ausschließlich vollständige Kapillarquer-

schnitte von 8,4 bis 13,8 μ Durchmesser. Sie sind in sehr geringer Entfernung vom Foramen apicale gelegen und bestehen aus einer einschichtigen Endothelzelllage (Abb. 8 und 9). Eine sich deutlich abzeichnende Basalmembran umgibt das Endothelrohr. Zwischen dieser Basalmembran und den äußeren Oberflächen der Endothelzellmembranen befindet sich eine feine Zone von Grundsubstanz, das Kapillargrundhäutchen, welches in seiner Breite geringfügig variabel ist (Abb. 8). Die Aneinanderlagerung der einzelnen Endothelzellen erfolgt auf verschiedene Weise. Am häufigsten tritt ein Ineingandergreifen der einzelnen Zytoplasmaausläufer auf. Seltener kann ein einfaches Zusammenstoßen oder ein Überlappen der schlanken Fortsätze beobachtet werden. In einem Fall ist ein sehr langer fadenförmiger Zellfortsatz schleifenartig zusammengelegt, bevor er die Nachbarzelle berührt (Abb. 9). Im Gegensatz zu den äußeren Oberflächen der Endothelzellen, die in der Regel einen glatten Verlauf zeigen, weisen die inneren relativ häufig winzige, verschieden stark ausgebildete Zytoplasmaausstülpungen, die sog. Mikrovilli, auf (Abb. 8). Das Zytoplasma selbst enthält verschiedene Arten von Einschlüssen, von denen vorrangig die vielen sehr dichten Mitochondrien imponieren. Weiterhin fallen neben vereinzelt Vakuolen in einigen Endothelzellen unzählige, zumeist geordnete Filamente auf (Abb. 8). Das endoplasmatische Retikulum ist nur äußerst schwach ausgebildet. Die Zellkerne lassen an ihren Außenflächen eine starke Zerklüftung erkennen. Sie sind meistens von langgestreckter Gestalt. Das reichlich vorhandene Chromatin ist zu seinem größten Teil an der Kernmembran abgelagert. Oft zeigen sich angeschnittene Nukleoli. In allen Fällen haftet mindestens ein Perizyt (Adventitiazelle) eng an der Außenwand des Endothelrohrs (Abb. 8). Die Perizyten weisen gegenüber den Endothelzellen keine wesentlichen Unterschiede auf. Lediglich die Kerne erscheinen

länger und flacher. Mehrfach können in der engen Umgebung der Kapillaren von diesen losgelöste und in die Interzellularsubstanz abgewanderte Perizyten gefunden werden.

d) Die Nerven

Im Apikalbereich der Pulpa zeigen die entsprechenden Ultradünnschnitte auf großen Teilen ihrer Fläche derart dicht beieinanderliegende Nervenfaserschnitte, daß nur sehr schmale Zonen von Interzellularsubstanz zwischen ihnen liegen. Bis auf wenige Ausnahmen enthalten die markreichen Fasern im Gegensatz zu den markarmen jeweils nur einen Achsenzylinder. Ein weiterer Unterschied zwischen den beiden Arten besteht darin, daß fast ausschließlich die markreichen Fasern neben zahlreichen Neurofilamenten und vereinzelten Vakuolen einen besonders hohen Gehalt an Mitochondrien aufweisen. Die Markscheiden zeigen entsprechend der Stärke der Axone sehr unterschiedliche Durchmesser. Außerdem sind sie von verschiedener Breite (0,21 bis 0,68 μ).

Die Querschnitte der markreichen Nervenfasern lassen den üblichen Aufbau erkennen. Eingebettet in das Zytoplasma der SCHWANN'schen Zelle liegen die das Axon umhüllende Markscheide und der Zellkern (Abb. 10). Zu bemerken ist, daß die SCHWANN'schen Zellkerne bei dieser Art von Fasern sehr oft angeschnitten sind. Häufig können noch Bestandteile der Kerne, insbesondere die Nukleoli, gesehen werden. Sehr deutlich zeichnet sich die lamelläre Struktur der Markscheide ab und die durch sie bedingte Längsstreifung (Abb. 11).

In einem Fall sind bei einer markreichen Nervenfaser drei Achsenzylinder innerhalb einer SCHWANN'schen Zelle zu sehen (Abb. 12). Da in anderen Fällen eine Abschnürung der Markscheide unter Bildung eines wesentlich kleineren zwei-

ten Achsenzyklinders beobachtet wird, ist auf eine Verzweigung der Nervenfasern innerhalb einer SCHWANN'schen Zelle zu schließen, wobei die abzweigende Faser zumindest noch in unmittelbarer Nähe der Abschnürungsstelle dieselbe Zelle durchzieht (Abb. 13).

In Abb. 10 sind als weitere Feinheiten in der Struktur der markreichen Nervenfasern das den Achsenzyklinder umhüllende Axolemma und die die SCHWANN'sche Zelle umgebende Basalmembran zu erkennen. Zwischen ihr und der Zellmembran befindet sich eine feine Zone Grundsubstanz konstanter Breite, die dem Grundhäutchen der Kapillaren sehr stark ähnelt.

Bei den markarmen Nervenfasern liegen fast ausschließlich mehrere Axone z.T. eng aneinandergedrängt im Zytoplasma der SCHWANN'schen Zelle (Abb. 10 und 13). Verglichen mit den Axonquerschnitten der markreichen Fasern sind die der markarmen bedeutend kleiner. Es werden bis zu sechs Achsenzyklinder gefunden; ihre einzelnen Durchmesser variieren stark. Zellkerne sind nur selten angeschnitten.

2. Das Hartgewebe

a) Das zementähnliche Gewebe

An den Randpartien der apikalen Abschnitte der Wurzelkanäle ist zwischen dem Prädentin und dem Dentin liegend eine mehr oder weniger zementähnliche Hartgewebsform zu beobachten. Sie ist in ihrer Struktur sehr variabel, so daß man in vielen Fällen von mehreren übereinandergelegenen Schichten sprechen muß, welche sich letztthin deutlich voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede bestehen zur Hauptsache in der Breite der Schichten, den verschiedenen Mineralisationsgraden und der variablen Größe der eingelagerten Kristalle.

Ein Beispiel für eine unverkalkte Randzone gibt Abb. 17. Es imponieren die sehr zahlreichen Kollagenfibrillen mit der für sie typischen Querstreifung. Dazwischenliegend sind kleine, bereits mineralisierte Gebiete anzutreffen. Auch vereinzelte kanalähnliche Gebilde von nur geringem Durchmesser sind vorhanden. Die Fibrillen erinnern stark an die der organischen Matrix des Dentins. Ihr Verlauf ist relativ geradlinig, so daß sie kein eigentliches Geflecht bilden. In einem ähnlichen Ultradünnschnitt aus einem anderen Zahn liegen in unmittelbarer Nähe der Randzone bis zu ca. 3 μ große rundliche Gebilde, die an Dentikel erinnern.

In Abb. 20 ist die Übergangszone einer mehr zementähnlichen Hartschubstanz zum Prädentin zu sehen. Unter dem Elektronenmikroskop zeigt sich die zementähnliche Schicht als ein ca. 8 μ breiter Streifen, welcher den Abschluß der hartgewebigen Randzone bildet. Die Abbildung gibt nur einen Ausschnitt aus diesem Streifen wieder, dessen Struktur selbst bei der Vergrößerung 20 000 : 1 schwer erkennbar ist. Die Matrix ist von relativer Homogenität, scheint jedoch eine sehr feine Körnelung zu besitzen. Lediglich der Übergang zum Prädentin verrät einige strukturelle Feinheiten. Es sind feinste kristallähnliche Mineralisationskeime zu erkennen, die vermutlich dem Streifen den Charakter der Körnelung verleihen. Auffallend sind sehr schmale hellere Bahnen, die parallel zueinander und ungefähr senkrecht zur Prädentingrenze den Streifen durchziehen. Sie scheinen oft unterbrochen zu sein und haben kleine rundliche, sehr dunkle Bezirke zwischen sich zu liegen.

Ähnliche Verhältnisse zeigt Abb. 14, nur sind die Mineralisationskeime noch feiner, dafür aber länger und nadelförmig. Die Parallelstreifung fehlt. Außerdem ist dieser Teil der

Randzone wesentlich schmaler. Die anschließende dunklere zementähnliche Schicht läßt lange geschwungene Kollagenfibrillenzüge mit angedeuteter Querstreifung erkennen, die mit kräftigeren kristallähnlichen Nadeln besetzt sind.

Den gleichen Bau, der auf Abb. 20 zu sehen ist, gibt Abb. 21 wieder, lediglich mit dem Unterschied, daß sich hier noch zusätzlich ein ca. 0,5 y breiter, gleichmäßiger Saum zeigt. Die überaus feinfädige Grundsubstanz ist mit unzähligen winzigsten Mineralisationskeimen besetzt. Den gleichen zweischichtigen Aufbau besitzen auch mehrfach zu beobachtende kompakte, auffällig abgerundete Gebilde, die unmittelbar in der Nähe des Saumes im Prädentin liegen.

Der nächste Fall (Abb. 22) zeigt einen Teil einer mehr zerklüfteten Randzone. Tieferliegend sind einige quergestreifte kollagene Fibrillen zu erkennen. Wie hier werden auch am Rand wiederum Unmengen von kleinsten Mineralisationskeimen gefunden. Sehr viele der Keime sind bis weit in das Prädentin hinein versprengt.

Abschließend soll jetzt an Hand von Abb. 23 die letzte Variante der zementähnlichen Hartgewebsbildungen erläutert werden. Diese Aufnahme entstammt einem Seitenkanal. Das Gewebe ist mineralisiert, und die eingelagerten Kristalle haben eine große Ähnlichkeit mit den langen dunklen Nadeln des Dentins. Im Anschluß ist ein schmaler diffuser Saum mit vielen größeren Mineralisationskeimen zu sehen.

b) Das Dentin

Im direkten Anschluß an die Zonen zementähnlicher Hartsubstanzbildung bietet sich das stets wiederkehrende Bild des Dentins der Apikalregion (Abb. 19), dem die typische Struk-

tur des normalen Dentins, wie es im oberen Wurzel- und im Kronenbereich angetroffen wird, fehlt. Die Dentinkanäle, welche im koronalen Dentin bis zur Pulpa verlaufen, enden hier schon einige μ vor dem Übergang zum Prädentin. Im pulpanahen apikalen Dentin werden gelegentlich kanalähnliche Gebilde beobachtet, die in ihrem Durchmesser wesentlich kleiner als die normalen Dentinkanäle sind. Die in das Kronendentin einstrahlenden Odontoblastenfortsätze fehlen im Apikalbereich völlig. Wie schon erwähnt, sind die Dentinkanäle in dieser Region obliteriert. Ihre Lumina sind gleichmäßig mit Hydroxylapatitkristallen ausgefüllt. Die sich hieraus ergebenden Lichtbrechungsverhältnisse bedingen eine gewisse Transparenz des Dentins, weshalb in der Lichtmikroskopie von "transparentem Dentin" gesprochen wird.

Abb. 18 zeigt zwei unterschiedliche Stufen irregulären Dentins. Die linke Partie, die der Pulpa näher liegt und noch dem Prädentin ähnelt, enthält winzige kanalähnliche Gebilde. Die rechte weist deutlich erkennbare Interglobularräume auf, welche eine starke Ähnlichkeit mit denen der TOMES'schen Körnerschicht des Wurzel dentins nahe der Dentin-Zement-Grenze haben. Sie imponieren im elektronenoptischen Bild als rundliche dunkle Bezirke von ca. 2 μ Durchmesser als Folge der ausgebliebenen Mineralisation der organischen Dentinmatrix.

ABBILDUNGEN

Bei den elektronenmikroskopischen Untersuchungen sind ca. 330 Aufnahmen mit Vergrößerungen von 5 000 : 1 bis 79 000 : 1 gemacht worden (elektronenoptische Vergrößerungen von 2 500 : 1 bis 39 500 : 1).

EV = Elektronenoptische Vergrößerung
BV = Bildvergrößerung

Die angegebenen Bildvergrößerungen beziehen sich auf die Originalphotos, deren Abbildungen im Druckverfahren um ca. 30% verkleinert worden sind.

Abb. 1: Fibroblasten im Endbereich der apikalen Pulpa.
Ihre Anordnung ist epitheloidzellartig.
EV 3 000 : 1 BV 6 000 : 1

Abb. 2: Fibroblasten. Auffällig sind die großen, rund-
lich bis ovalen Zellkerne. Zwischen den Zellen
liegen dicht gepackt kollagene Fasern.
EV 6 000 : 1 BV 12 000 : 1

Abb. 3: Fibroblasten. Der Zellkern auf der rechten Seite
des Bildes zeigt mehrere angeschnittene Nukleoli.
Im Zytoplasma befindliche Mitochondrien weisen
kräftig ausgebildete Cristae mitochondriales auf
(unterer Bildrand).
EV 6 000 : 1 BV 12 000 : 1

Abb. 4: Fibrozyt in der Foraminalregion der apikalen
Pulpa. Der Zellkern ist im Vergleich zu dem des
Fibroblasten von schlanker, langgestreckter Gestalt.
EV 17 500 : 1 BV 35 000 : 1

Abb. 5: Fibrozyt. In der oberen Bildhälfte ist ein feiner
Zytoplasmaausläufer zu sehen. Die Querstreifung
der sehr dicht gelegenen kollagenen Mikrofibrillen
ist teilweise deutlich sichtbar (untere Bildhälfte
links).
EV 17 500 : 1 BV 35 000 : 1

Abb. 6: Retikuläre Atrophie der apikalen Pulpa. In der
mehr oder weniger strukturlosen Grundsubstanz lie-
gen Zellreste und aufgelockerte kollagene Fasern
mit deutlicher Querstreifung.
EV 10 000 : 1 BV 20 000 : 1

- Abb. 7: Kollagene Mikrofibrillen. In ihrer Feinstruktur deutlich erkennbar sind die die Querstreifung bewirkenden hellen und dunklen Abschnitte.
EV 26 000 : 1 BV 52 000 : 1
- Abb. 8: Kapillaren im Endbereich der apikalen Pulpa. Die sie umhüllende Interzellulärsubstanz weist neben der Grundsubstanz quer-, schräg- und längsgetroffene kollagene Mikrofibrillen auf. Kapillarlumen (L), Kapillargrundhäutchen (G), Zytoplasma (Z) und Kern (K) einer Endothelzelle, Mikrovilli (M), im Zytoplasma befindliche Filamente (F), Perizyt (P).
EV 4 000 : 1 BV 16 000 : 1
- Abb. 9: Kapillarquerschnitt. Kapillarlumen (L), schleifenartig zusammengelegter Zytoplasmaausläufer (A) einer Endothelzelle (E).
EV 4 000 : 1 BV 16 000 : 1
- Abb. 10: Querschnitt einer SCHWANN'schen Zelle bei einer markreichen Nervenfaser. Im Zytoplasma liegen der von der Markscheide umgebene Achsenzylinder und der Zellkern. Auch Querschnitte SCHWANN'scher Zellen bei markarmen Nervenfasern sind zu sehen. Untere Bildhälfte rechts: drei Phasen der Markscheidenbildung.
EV 7 000 : 1 BV 14 000 : 1
- Abb. 11: Lamelläre Struktur der Markscheide. Die Längsstreifung ist deutlich sichtbar. Der Achsenzylinder (A) wird vom Axolemma (x) umgeben.
EV 39 500 : 1 BV 79 000 : 1

Abb. 12: Querschnitt einer markreichen Nervenfaser. Es zeigen sich drei Axone innerhalb einer SCHWANN'schen Zelle. Im Hauptaxon finden sich Mitochondrien, Vakuolen und Neurofilamente.

EV 10 000 : 1 BV 20 000 : 1

Abb. 13: Querschnitte markreicher und markarmer Nervenfasern. In der unteren Bildhälfte ist die Abschnürung (x) einer markreichen Faser zu sehen. In ihrer Umgebung liegen einige markarme Fasern, die jeweils mehrere Achsenzylinder enthalten.

EV 3 000 : 1 BV 6 000 : 1

Abb. 14: Zementähnliches Hartgewebe in der Randzone des apikalen Teils eines Wurzelkanals. In dieser Zone befinden sich Ummengen von feinsten, nadel-förmigen Mineralisationskeimen. Ihr vorgelagert ist der Prädentinbereich.

EV 10 000 : 1 BV 20 000 : 1

Abb. 15: Prädentin. Die jungen kollagenen Mikrofibrillen zeigen sich quer- und längsgetroffen und weisen eine deutliche Querstreifung auf. Das Bild entstammt einem Seitenkanal.

EV 13 000 : 1 BV 26 000 : 1

Abb. 16: Im Prädentin liegender Odontoblastenfortsatz. Charakteristisch ist die fädige Struktur des Zytoplasma. In der engen Umgebung liegen jüngste kollagene Mikrofibrillen von teilweise sehr grossem Durchmesser. Die Periodenlänge ist kürzer als bei der ausgereiften Form.

EV 10 000 : 1 BV 20 000 : 1

Abb. 17: Unverkalkter Bereich in der Randzone des apikalen Teils eines Wurzelkanals. Ihr vorgelagert ist das Prädentin.

EV 6 000 : 1 BV 12 000 : 1

Abb. 18: Zwei unterschiedliche Stufen irregulären Dentins. Links: Die pulpanahe Stufe ähnelt noch dem Prädentin. Rechts: In diesem Bereich sind deutlich erkennbare Interglobularräume anzutreffen. Sie imponieren als rundliche dunkle Bezirke (untere Bildhälfte).

EV 3 000 : 1 BV 6 000 : 1

Abb. 19: Nichtkanalisiertes Dentin der Apikalregion. Es findet sich im direkten Anschluß an die Zonen zementähnlicher Hartsubstanzbildung.

EV 9 000 : 1 BV 18 000 : 1

Abb. 20: Zementähnliches Hartgewebe in der Randzone. Die Matrix ist relativ homogen; die Mineralisationskeime sind sehr fein.

EV 10 000 : 1 BV 20 000 : 1

Abb. 21: Zementähnliches Hartgewebe in der Randzone. Es weist eine starke Ähnlichkeit mit dem in Abb. 20 gezeigten auf. Zusätzlich findet sich hier ein ca. 0,5 y breiter Saum.

EV 20 000 : 1 BV 40 000 : 1

Abb. 22: Zementähnliches Hartgewebe in der Randzone. Diese ist hier mehr zerklüftet. Die Mineralisationskeime sind z.T. bis weit in das Prädentin hinein versprengt.

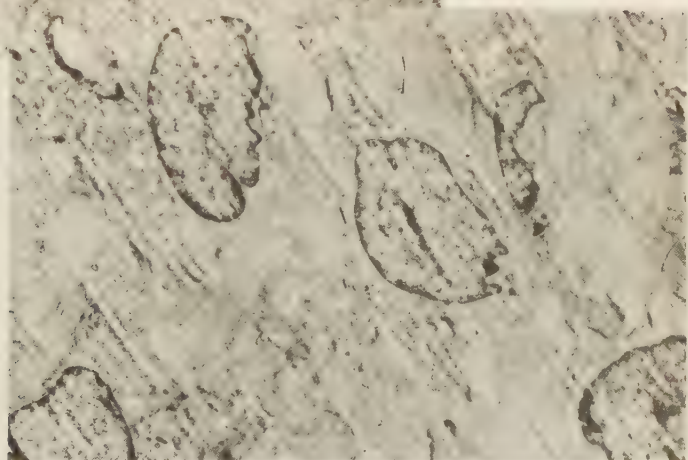
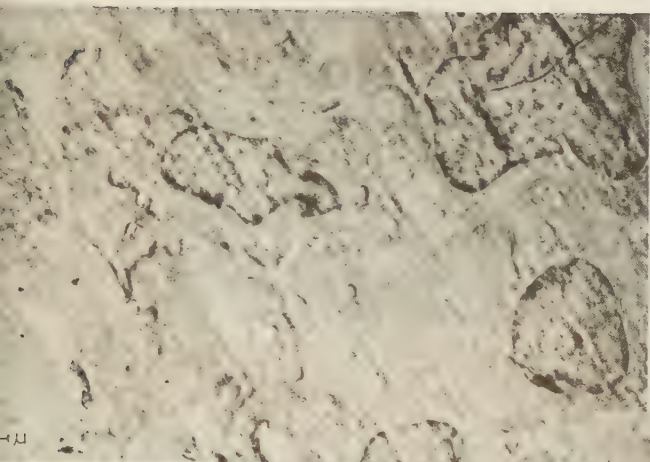
EV 6 000 : 1 BV 12 000 : 1

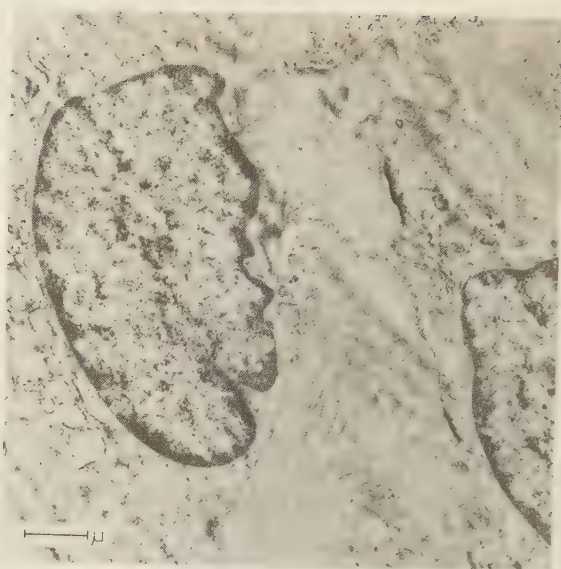
Abb. 23: Zementähnliches Hartgewebe in der Randzone. Es ist mineralisiert. Ein schmaler diffuser Saum zeigt viele größere Mineralisationskeime. Die Aufnahme stammt aus einem Seitenkanal.

EV 10 000 : 1 BV 20 000 : 1

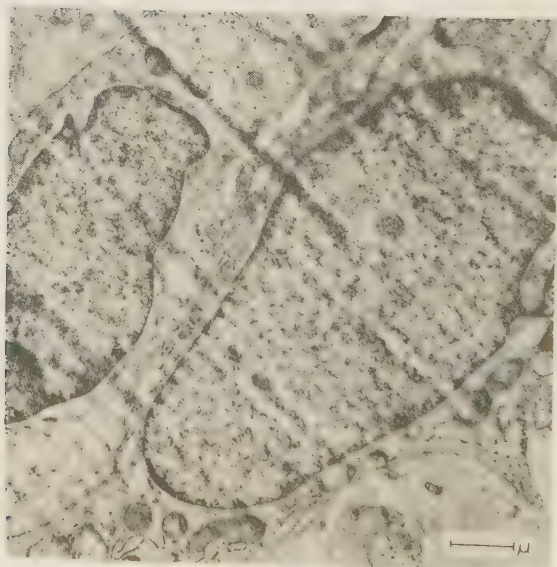
Abb. 24: Gewebe der apikalen Pulpa und zementähnlicher Anteil der hartgewebigen Randzone in einem Seitenkanal. Sämtliche Gewebsstrukturen weisen keine wesentlichen Unterschiede zu denen in den Hauptkanälen auf.

EV 4 000 : 1 BV 8 000 : 1

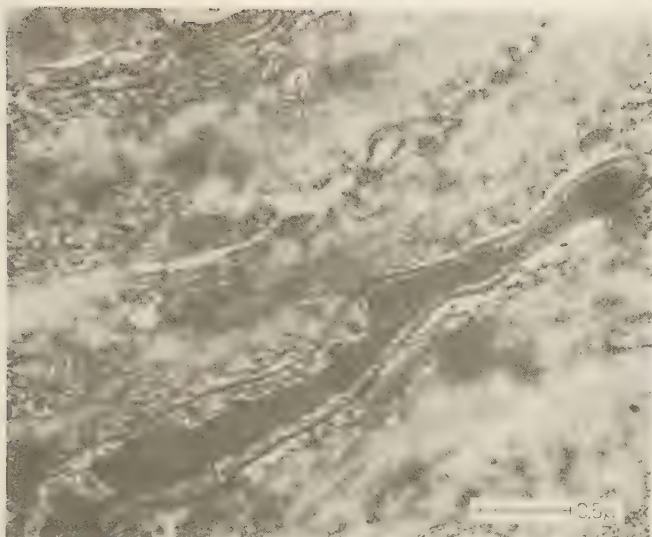




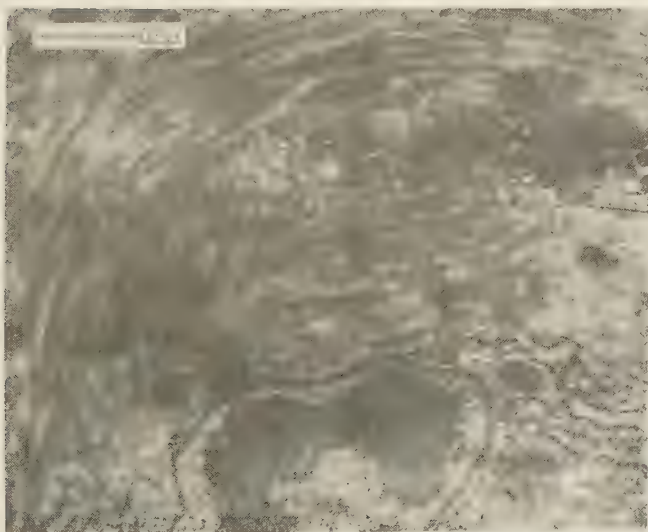
2



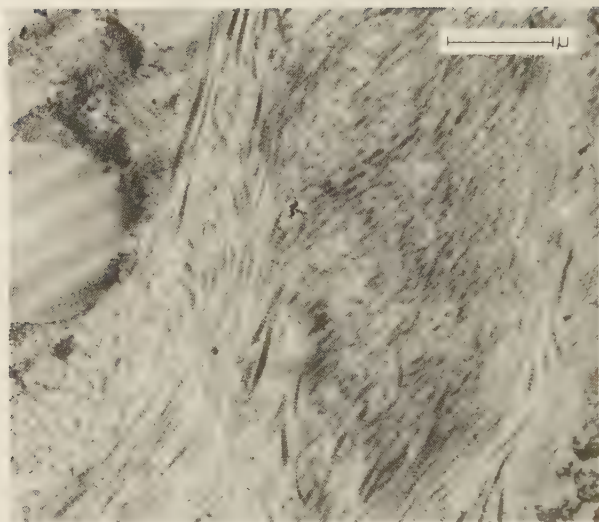
3



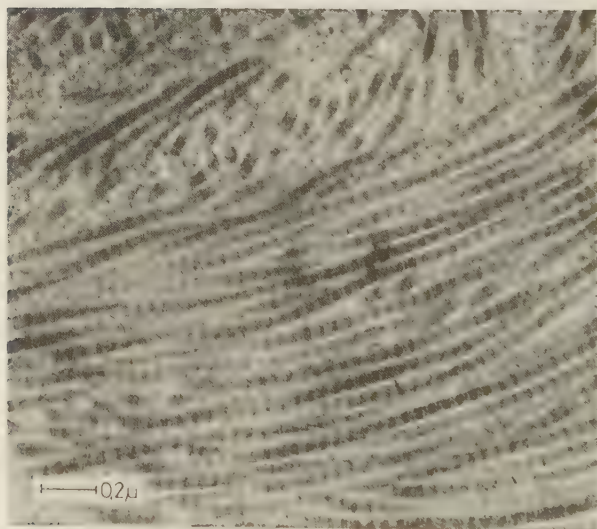
4



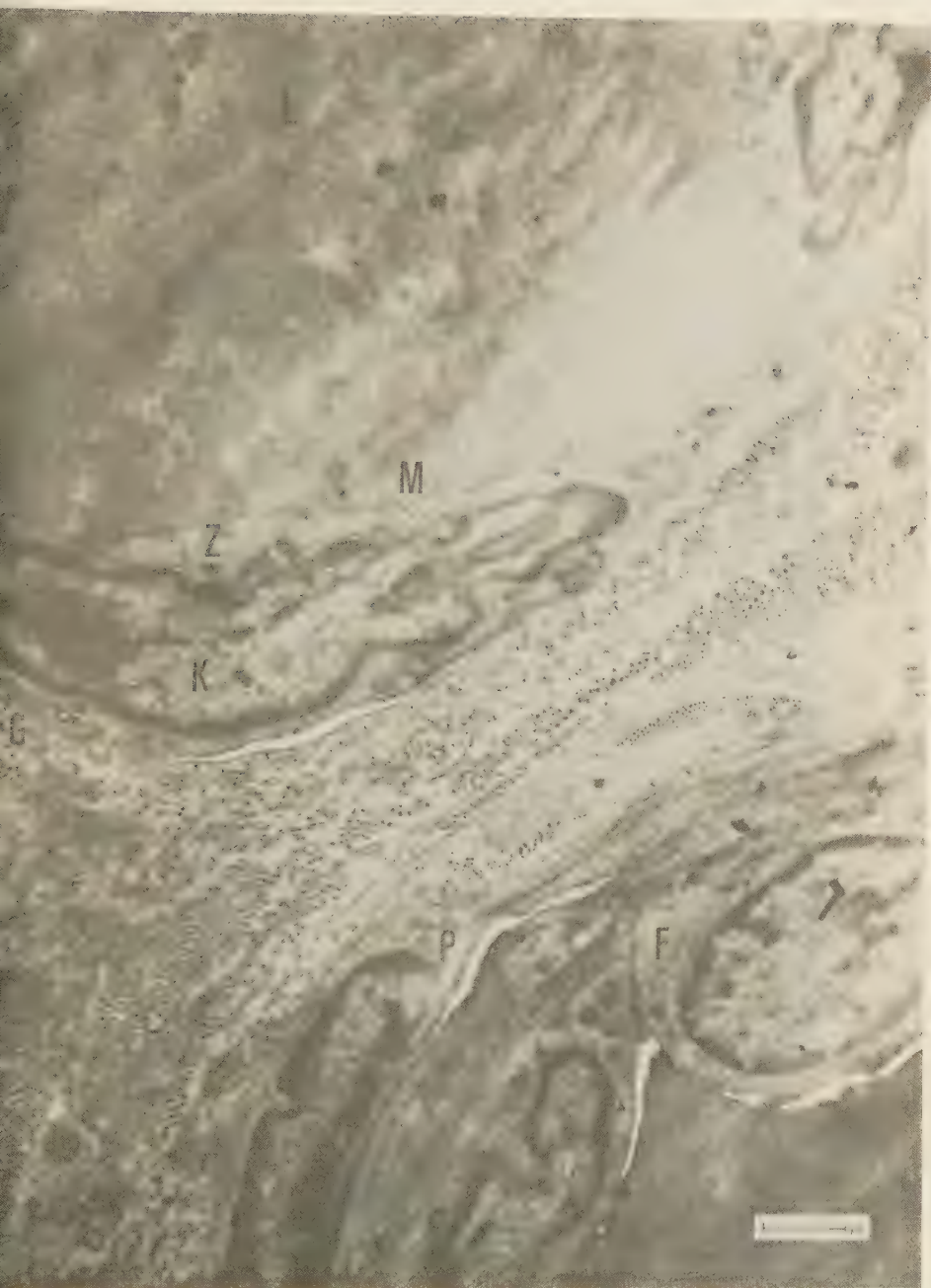
5



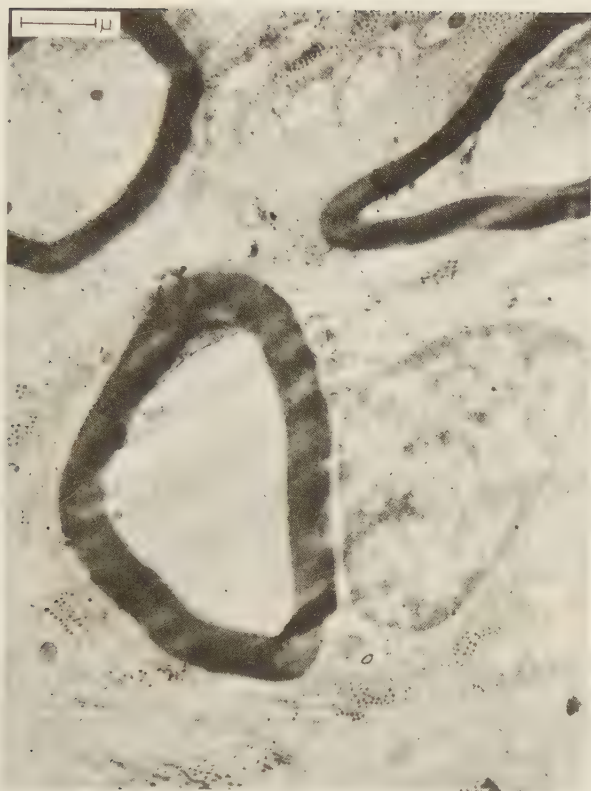
6



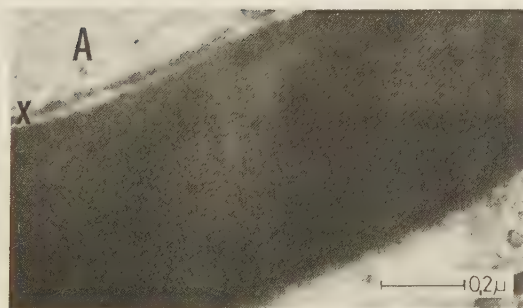
7







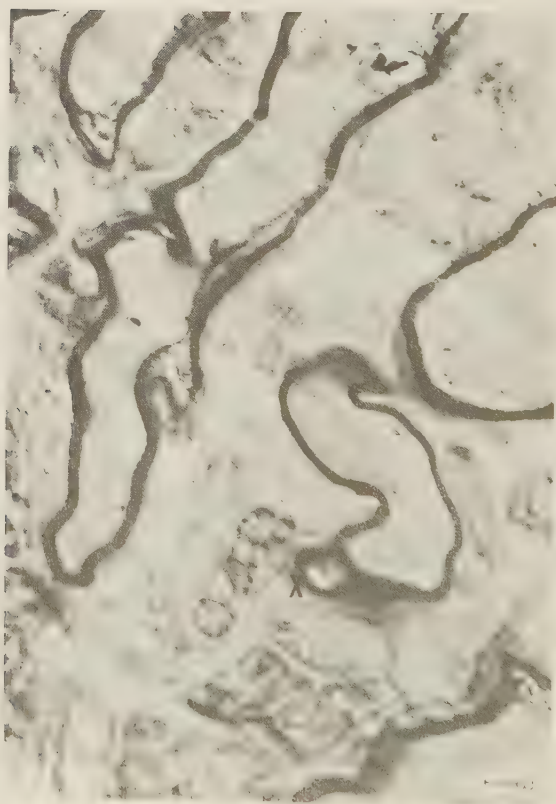
10



11



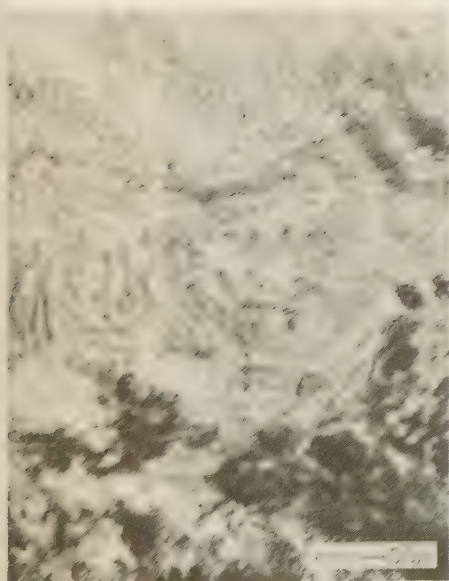
12



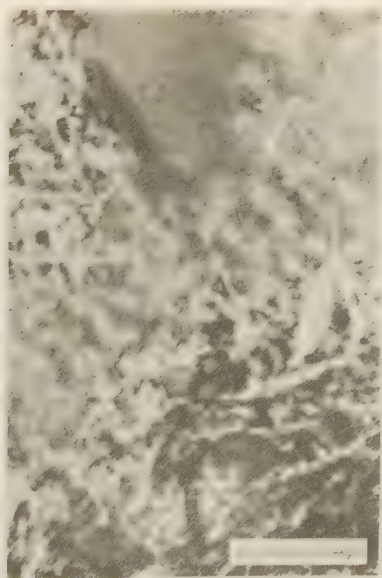
13



14



15



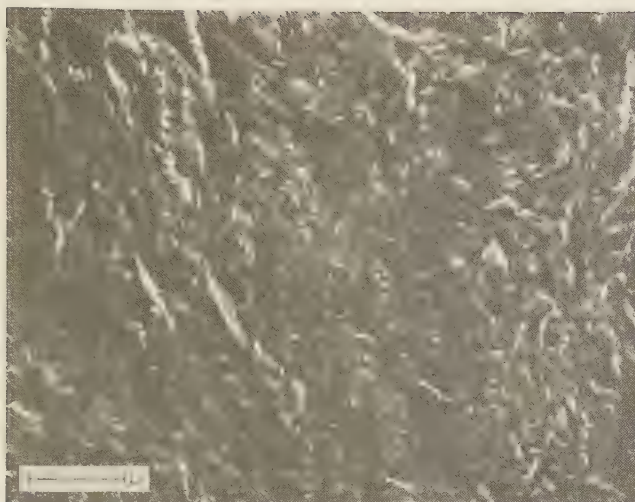
16



17



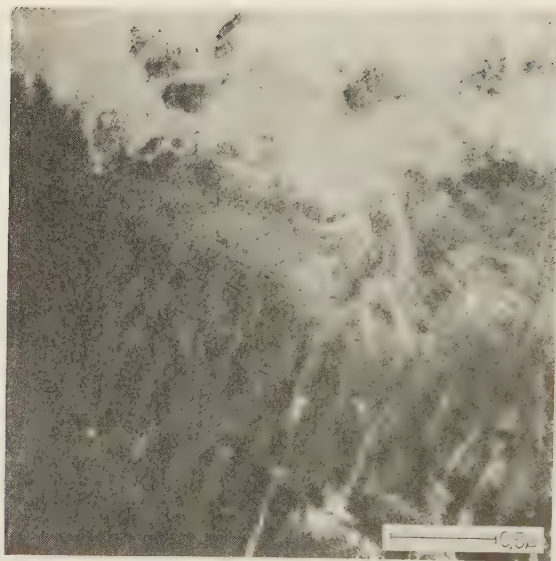
18



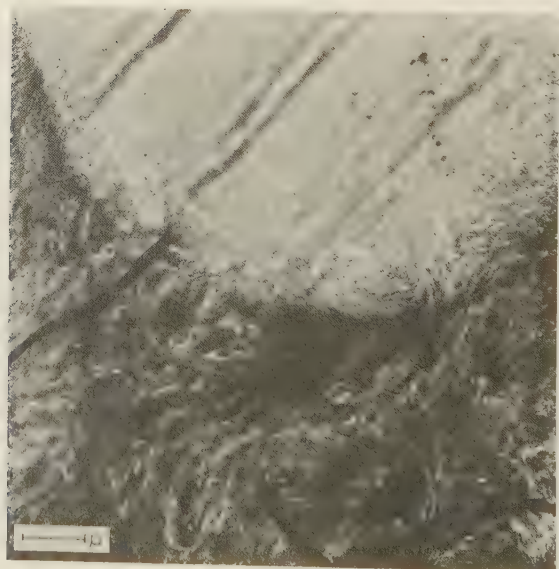
19



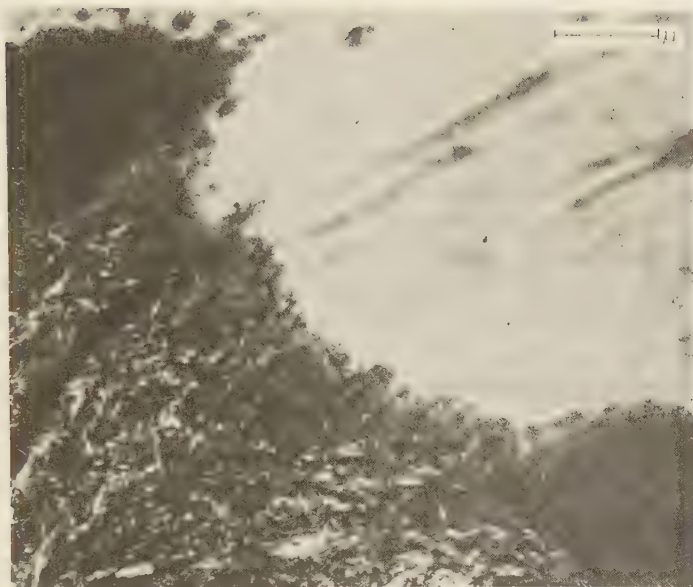
20



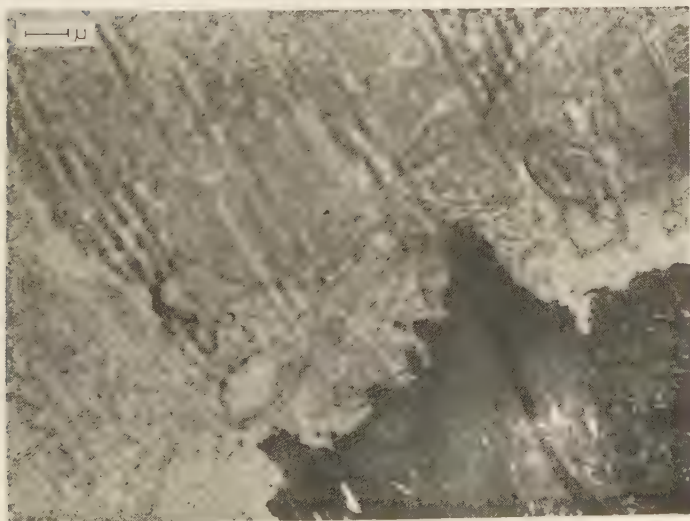
21



22



23



24

E. DISKUSSION

Betrachtet man das allgemeine Bild der Pulpa im Apikalbereich, so sind einige wesentliche Unterschiede zu höher gelegenen Abschnitten der Wurzelpulpa und zur Kronenpulpa festzustellen. Auffallend im gesamten apikalen Teil, besonders in der Region des Foramen apicale, ist der hohe Gehalt an kollagenen Fibrillen, welche zum größten Teil zu Fasern gebündelt sind. Dies steht in starkem Gegensatz zu den vereinzelt Fibrillen der Kronenpulpa. Die im apikalen Pulpagewebe anzutreffenden Mikrofibrillen sind in ihrer Ultrastruktur und ihrem Durchmesser mit in anderen Körpergeweben vorkommenden, wie sie u.a. BUCHER (1967) beschrieben hat, identisch. Nach Beschreibungen von SCHWARZ, MERKER, JAHNKE und HOFMANN (1958) besteht Übereinstimmung mit der Stärke der Mikrofibrillen in den bradytrophen Geweben. Deutlich zeigen die elektronenoptischen Befunde der vorliegenden Arbeit, daß die kollagene Fasermasse vom Foramen apicale in koronaler Richtung allmählich abnimmt. Hierbei handelt es sich um fließende Übergänge. Genauer bestimmbar Übergangszonen, wie sie G. FISCHER (1952), TSCHAMER (1968) und KLUCZKA (1954) lichtmikroskopisch beschrieben haben, sind nicht festzustellen. Weiterhin zeigen die Befunde, daß der Kollagengehalt der apikalen Pulpa mit zunehmendem Alter steigt. Dies entspricht auch der praktischen Erfahrung beim Extrahieren, wo sehr oft beobachtet werden kann, daß gerade bei alten Patienten der apikale Pulpaanteil abreißt und in der Tiefe der Alveole verbleibt.

Vorwiegend in der Region des Foramen apicale sind in der Wurzelpulpa Zellen zu beobachten, welche relativ dicht beieinanderliegen. Es lassen sich zwei Typen feststellen, die den in der Lichtmikroskopie als Fibroblasten und Fibrozyten

gedeuteten Zellen entsprechen. Die Fibrozyten bilden einen netzähnlichen Verband. Ihre feinen Zytoplasmaausläufer liegen in einer Größenordnung außerhalb des lichtoptischen Auflösungsvermögens. Im Elektronenmikroskop kann mit Sicherheit festgestellt werden, daß die Ausläufer nie ineinander übergehen, sondern an ihren Berührungsflächen stets voneinander abgrenzbare Zellmembranen erkennen lassen. Dies schließt das Vorliegen eines synzytialen Verbandes der Fibrozyten, wie ihn W. MEYER (1951) beschrieben hat, aus. Ein bedeutender Unterschied zur Kronenpulpa besteht in dem völligen Fehlen von hochdifferenzierten Odontoblasten.

Der für die Pulpa typische Reichtum an Gefäßen und Nerven ist auch im Apikalbereich vorhanden. Daß sich bei den Befunden verhältnismäßig wenig Kapillaren zeigen, scheint auf den Zusatz von Vasokonstriktoren zu den Lokalanästhetika, die bei der Extraktion verwandt worden sind, zurückzuführen zu sein. Der einzige ermittelte Kapillartyp kann der von BENNET, LUFT und HAMPTON (1959) vorgeschlagenen Klassifizierung als Typ A zugeordnet werden. Er ist in allen Geweben, vorwiegend jedoch im Bindegewebe, zu finden und zeichnet sich durch eine vollständig kontinuierliche Basalmembran aus. BENNET, LUFT und HAMPTON stellen diesem Typ A den Typ B ohne vollständige Basalmembranhülle gegenüber.

Die zahlreichen Nervenbefunde zeigen in wesentlichen Zügen Übereinstimmung mit elektronenoptischen Untersuchungsergebnissen mehrerer Autoren wie HAIM (1965), MATTHEWS, DORMAN und BISHOP (1959), UCHIZONO und HOMMA (1959) u.a. Im Gegensatz zu Autoren, die bei den markreichen Nervenfasern von jeweils nur einem Achsenzyylinder, welcher eine SCHWANN'sche

Zelle durchläuft, sprechen, ist beobachtet worden, daß auch hier, wie bei den markarmen Fasern, eine SCHWANN'sche Zelle mehrere Axone zu umfassen vermag. Hierbei handelt es sich sehr wahrscheinlich um die nähere Umgebung einer Abzweigung. Die Abb. 10 gibt drei entwicklungsgeschichtlich bedeutsame Phasen der Markscheidenbildung wieder. Es handelt sich um die Zellmembraneinstülpung mit schon z.T. versenktem embryonalem Axon, um die bereits angedeutete und die gerade abgeschlossene Mesaxonbildung.

Seiner Struktur nach ist das Gewebe der apikalen Pulpa als mehr oder weniger lockeres Bindegewebe zu betrachten. Dies steht im Gegensatz zur übrigen Pulpa, welche zum gallertigen Bindegewebe tendiert.

Daß die Wurzelspitzenpulpa den Charakter eines lockeren Bindegewebes hat, läßt sich auch recht deutlich an den angrenzenden Geweben ablesen.

Den der Pulpa am nächsten liegenden Teil der Randzone bilden fast immer mehrere Schichten einer Hartschicht mit teilweise homogen anmutender Matrix und eingelagerten Kristallen unterschiedlicher Größe. Ihre Größenordnung entspricht derjenigen der Hydroxylapatitkristalle des Zements. Nicht wie beim Zement dagegen zeigt sich das Kollagenfibrillengeflecht der Grundsubstanz. Gleicht es beim Zement dem eines derben Bindegewebes, so zeigt es hier einen mehr lockeren Charakter ähnlich der Dentinmatrix.

Neben mehreren als irreguläres Dentin zu deutenden Stufen zeigt sich in der Randzone nichtkanalisiertes Dentin. In ihm sind die Dentinkanäle obliteriert. Dies verleiht, wie bereits beschrieben, dem nichtkanalisierten Dentin sein

transparentes Aussehen. Gelegentlich können noch kanal-ähnliche Gebilde von einem Durchmesser, der wesentlich kleiner als der der normalen Dentinkanäle ist, gefunden werden. Kanalisiertes Dentin ist erst tiefer in einer Entfernung von einigen μ vorhanden.

Betrachtet man die Randzone als Ganzes, so reicht ihre Strukturierung vom intertubulären Dentin bis zu den erwähnten zementähnlichen Schichten. Verglichen mit der Bildung irregulären Dentins ergibt sich bei der Entstehung der Randzone das gleiche Bild. Nicht zuletzt spricht man beim irregulären Dentin von einer ersten bis vierten Ordnung.

Noch nicht veröffentlichte Untersuchungsergebnisse von R. HARNDT und LENZ (nach einer persönlichen Mitteilung) zeigen, daß die Pulpa auch nach Zugrundegehen der Odontoblasten noch imstande ist, Hartschubstanz zu bilden. R. HARNDT und LENZ haben in Versuchen an Ratten die Odontoblasten durch Entzug von Vitamin C geschädigt. Dies hat zur Folge gehabt, daß mit dem Einsetzen der Mangelerscheinungen Substanzen verschiedener Struktur, jedoch eindeutig dentinogenen Ursprungs, gebildet worden sind. Sie weisen z.T. eine erstaunliche Ähnlichkeit mit den in der vorliegenden Arbeit gezeigten Formen auf. Nach Wiederaufführung von Vitamin C sind von den Odontoblasten wiederum sämtliche Dentinstufen gebildet worden.

Somit kann die Struktur der Randzone als Widerspiegelung der dentinbildenden Fähigkeiten des apikalen Pulpagewebes angesehen werden. Hierauf beruht auch die Tatsache, daß im Vergleich zum Kronenbereich in der Wurzelspitzenregion eine relativ geringe Anlagerung irregulären Dentins erfolgt. Sie ist hier mehr oder weniger allein auf regressive Vorgänge

zurückzuführen. Im koronalen Bereich dagegen kann ein kariöser Defekt eine verhältnismäßig starke Anlagerung hervorrufen. Ausgelöst durch Bakterientoxine kommt es über eine Proliferation des Pulpagewebes schließlich zur Ausdifferenzierung der Zellen zu Odontoblasten, welche das irreguläre Dentin produzieren.

Die Zone der zementähnlichen Hartsubstanzen, die man aus allen besprochenen Faktoren folgernd als Zone zementähnlichen Dentins bezeichnen muß, weist auf die geringe Aktivität und Differenzierung der Fibroblasten und Fibrozyten in Richtung Odontoblasten hin, was eben nur geringe dentinbildende Fähigkeiten zur Folge haben kann. Auch das mikromorphologische Bild der Zellen bestätigt dies. Sie zeigen im Gegensatz zu hochdifferenzierten Odontoblasten der Kronenpulpa in ihrer aktiven Phase niemals das typische stark ausgeprägte endoplasmatische Retikulum.

Wenn man die elektronenoptischen Aufnahmen der zementähnlichen Gewebsformen betrachtet, so ist durchaus verständlich, daß sie in der Lichtmikroskopie bisher fälschlich als Zementschicht gedeutet worden sind. Bei der Feinheit der Bauelemente müssen diese Schichten im Lichtmikroskop mit seinem geringen Auflösungsvermögen homogen erscheinen und somit ein dem Zement sehr ähnliches Bild liefern.

Die häufig vertretene Theorie einer Zementbildung innerhalb des Pulpakavum durch einwucherndes Wurzelhautgewebe darf auf Grund aller genannten Faktoren als überflüssig angesehen werden. Es handelt sich eben nicht um Zement, sondern um Dentin unterschiedlicher Ordnung, welches von den Zellen der bindegewebigen apikalen Pulpa gebildet wird.

Hieraus ergeben sich einige Konsequenzen für die praktische Zahnheilkunde. Wesentlich sind folgende Tatsachen: erstens, daß die apikale Pulpa als ein mehr oder weniger lockeres Bindegewebe anzusehen ist, von welchem erwartet werden darf, daß es nach sorgfältiger Exstirpation an der Abrißstelle vernarbt; zweitens, daß die Dentinkanäle in der Randzone obliteriert sind, was die Gefahr einer "Infektion" des Dentins ausschließt. Wie NEUMANN (1968) gezeigt hat, ist das Vordringen von Mikroorganismen im Fall nichtkanalisierter irregulären Dentins ausgeschlossen.

Auch eine häufig anzutreffende Restvitalität in den Fällen von offener Gangrän, scheint auf die Richtigkeit der Deutung des apikalen Pulpagewebes als lockeres Bindegewebe hinzuweisen.

Als Grundlagen für eine erfolgversprechende Wurzelkanalbehandlung können das Belassen des apikalen Pulpaanteils, das gründliche mechanische Entfernen aller organischen Reste aus dem Kanal und die abschließend durchzuführende wandständige Wurzelkanalfüllung angesehen werden. Bei der Exstirpation ist die Abrißstelle mit dem Übergang der lockeren Wurzelpulpa zur bindegewebigen apikalen Pulpa auf Grund praktischer Erfahrungen identisch. In den Fällen von offener Gangrän der Pulpa mit einer Restvitalität ist der apikale Gewebsanteil ebenfalls zu belassen.

Die genannten Grundlagen sind bereits vor Jahrzehnten auf der Basis von Strukturanalysen durch das Lichtmikroskop empfohlen worden. Jetzt, wo endgültige elektronenmikroskopische Befunde vorliegen, muß diese Empfehlung zur Forderung gemacht werden.

Dieser Forderung wird die auf Grund lichtoptischer Erkenntnisse entwickelte Methode der Dentinstufen-Meßtechnik gerecht. Sie besagt u.a., daß das Pulpagewebe unter röntgenologischer Meßkontrolle bis zum Übergang der lockeren Wurzelpulpa zum bindegewebigen Endabschnitt entfernt wird. Es bleibt somit der in dieser Arbeit untersuchte Pulpabereich unberührt. Wie bereits erwähnt, darf an der Abrißstelle mit Vernarbung gerechnet werden. Dies gewährleistet eine herabgesetzte Infektionsgefahr des periapikalen Raumes. Selbst eventuell vorhandene Seitenkanäle dürften eine aussichtsreiche Therapie nicht gefährden, da deren Aufbau ja im wesentlichen mit dem der Hauptkanäle identisch ist.

In der Berliner Klinik wird diese Methode der Wurzelkanalbehandlung bereits seit Jahren mit Erfolg durchgeführt.

F. ZUSAMMENFASSUNG

Der apikale Pulpaanteil und die ihn umgebenden Hartgewebe sind an vitalen bleibenden menschlichen Zähnen elektronenmikroskopisch untersucht worden. Hierdurch sollen bisherige Untersuchungsergebnisse präzisiert bzw. korrigiert und neue Erkenntnisse hinzugewonnen werden:

1. Die im apikalen Pulpagewebe angetroffenen Zellen entsprechen den lichtoptisch beschriebenen Fibroblasten und Fibrozyten.
2. Ein lichtmikroskopisch gedeuteter synzitialer Verband der Fibrozyten existiert nicht.
3. Typische Odontoblasten fehlen im Apikalbereich nahezu vollständig.
4. Das apikale Pulpagewebe entspricht einem mehr oder weniger lockeren Bindegewebe.
5. Die Fasermasse ist rein kollagener Natur; sie nimmt bei fließenden Übergängen in koronaler Richtung ab.
6. Der Gehalt der apikalen Pulpa an Kollagenfasern nimmt mit steigendem Lebensalter zu.
7. Der einzige nachgewiesene Kapillartyp ist der von BENNET, LUFT und HAMPTON vorgeschlagenen Klassifizierung als Typ A zuzuordnen.
8. Endothelzellen und Perizyten werden beschrieben.
9. Markarme und markreiche Nervenfasern werden nachgewiesen und eingehend beschrieben.
10. Im Übergangsgebiet der Pulpa zur hartgewebigen Randzone ist regelmäßig Prädentin zu finden.

11. Die hartgewebige Randzone setzt sich zusammen aus nichtkanalisiertem Dentin und zementähnlichem Hartgewebe verschiedener Strukturierungen.
12. Bei dem zementähnlichen Hartgewebe handelt es sich um Dentin unterschiedlicher Ordnung.
13. Mehrfach sind dentikelähnliche Gebilde, die ebenfalls aus diesem zementähnlichen Gewebe bestehen, im Prä-dentin anzutreffen.
14. Die zementähnliche Hartschubstanz wird von den Fibroblasten und Fibrozyten des apikalen Pulpagewebes gebildet, welche eine geringe Aktivität besitzen und nur sehr schwach im Sinn von Odontoblasten differenziert sind.
15. Zement wird innerhalb des Pulpakavum nicht gebildet. Somit ist die häufig vertretene Theorie der Zementbildung im Wurzelkanal durch einwucherndes Wurzelhautgewebe als überflüssig zu betrachten.
16. Die Seitenkanäle weisen im wesentlichen keine Unterschiede zu den Hauptkanälen auf.
17. In den Fällen einer im klinischen Sinn geschädigten Pulpa bzw. einer offenen Gangrän bei Restvitalität ist bei Durchführung einer Wurzelkanalbehandlung der bindegewebige apikale Pulpaanteil zu belassen.
18. Am Übergang der Wurzelpulpa zur Wurzelspitzenpulpa ist nach sorgfältigem Entfernen der ersteren auf Grund des Bindegewebscharakters der apikalen Pulpa mit Vernarbung zu rechnen, die eine herabgesetzte Infektionsgefahr des periapikalen Raumes gewährleistet.
19. Von allen Wurzelkanalbehandlungsmethoden ist für die oben genannten Fälle das Verfahren der Dentinstufen-Meßtechnik als die Methode der Wahl anzusehen.

- SELTZER, S.,
W. SOLTANOFF,
I.B. BENDER and
M. ZIONTZ
- Biologic aspects of endodontics.
I. Histologic observations of
the anatomy and morphology of
root apices and surrounding
structures.
Oral Surg. 22, 375 (1966)
- SOLTANOFF, W.
- siehe SELTZER, S.
- STÖHR, Ph.,
W. v. MÖLLENDORFF und
K. GOERTTLER
- Lehrbuch der Histologie und der
mikroskopischen Anatomie des
Menschen. 29. Aufl.
G. Fischer, Stuttgart 1963
- TALLEN, B.
- siehe RIEDEL, H.
- TSCHAMER, H.
- Die Wurzelkanalfüllung.
Zahnärztl. Mitt. 58, 695 (1968)
- UCHIZONO, K. and
K. HOMMA
- Electronmicroscopic studies on
nerves of human tooth pulp.
J. dent. Res. 38, 1133 (1959)
- ZIONTZ, M.
- siehe SELTZER, S.

An dieser Stelle spreche ich Herrn Professor Dr. Hans LENZ meinen herzlichsten Dank aus für die freundliche Überlassung des Themas und die großzügige Unterstützung, die er mir aus seiner reichen Erfahrung auf dem Gebiet der Elektronenmikroskopie heraus gewährt hat.

Ebenso gilt mein Dank Fräulein Helga LINDNER für die Einweisung in die Präparationsmethoden, die ständige Hilfsbereitschaft beim Mikroskopieren und die phototechnischen Arbeiten.

L E B E N S L A U F

Am 24. Januar 1942 wurde ich, Michael Biernat, als Sohn des technischen Kaufmanns Erich Biernat und dessen Ehefrau Ilse Biernat, geb. Krobs, in Berlin-Charlottenburg geboren.

Meine Schulzeit verbrachte ich von der Einschulung im Herbst 1948 bis zur Reifeprüfung am 23. Februar 1961, die ich an der Robert-Blum-Schule, Oberschule wissenschaftlichen Zweiges, ablegte, in Berlin-Schöneberg. Im April 1961 ließ ich mich an der Freien Universität Berlin für das Studium der Zahnheilkunde einschreiben. Hier bestand ich am 28. April 1964 die zahnärztliche Vorprüfung und am 23. Februar 1967 die zahnärztliche Prüfung. Die Bestallung als Zahnarzt erhielt ich am 20. März 1967. Seitdem übe ich in Berlin als Assistenzzahnarzt meinen Beruf aus.

